

12_16

CONSTRUÇÃO E PROTEÇÃO SÍSMICA MODELAÇÃO DO COMPORTAMENTO SÍSMICO DE CONSTRUÇÕES DE TAIPA PARA FORA DO PLANO

Milhões de pessoas vivem atualmente em edifícios construídos em terra, que é também o material de construção principal de diversos sítios classificados como Património Mundial. Estes factos demonstram a importância histórica da terra enquanto material de construção para a humanidade. As construções de terra apresentam geralmente um bom comportamento às cargas gravíticas, mas diversos sismos intensos recentes têm demonstrado uma vulnerabilidade sísmica elevada. Assim, o estudo do comportamento sísmico destas construções e o desenvolvimento de soluções de reforço eficientes, compatíveis e economicamente acessíveis tem-se demonstrado necessário para a redução do risco sísmico associado. Este artigo apresenta um estudo numérico avançado do desempenho sísmico de um componente de taipa, simples e reforçado, para fora do plano usando o método dos elementos finitos.

Daniel V. Oliveira, Reza Allahvirdizadeh, Rui A. Silva
Universidade do Minho

O Homem tem utilizado historicamente a terra como material de construção, através de diversas técnicas construtivas tradicionais, entre as quais as mais conhecidas são o adobe e a taipa. Contudo, a continuação da utilização deste material, bem como a reabilitação e reforço do património construído exigem uma compreensão abrangente do comportamento das construções de terra. Estruturalmente, as construções de terra exibem um comportamento aceitável perante cargas gravíticas, mas apresentam elevada vulnerabilidade sob ações laterais. Além disso, muitas das construções de terra concentram-se em regiões com perigosidade sísmica não negligenciável. Muitas pessoas que habitam construções de terra nestas regiões foram afetadas em sismos recentes, como por exemplo em Erzinkan na Turquia (1992), Bam no Irão (2003), Pisco no Peru (2007) e Concepción no Chile (2010). A construção em taipa consiste na compactação de camadas de terra húmida no interior de

uma cofragem para erguer paredes. Exibe uma resistência baixa à compressão e muito baixa à tração [1]. Além disto, o comportamento sísmico deficitário das construções de taipa deve-se a roturas frágeis devido a ações para fora do plano e fendas nos cunhais, que muitas vezes conduzem a perdas de integridade estrutural [2].

Recentemente, foram desenvolvidos diversos estudos experimentais para a caracterização das propriedades dos sistemas de reforço à base de rebocos armados (*"Textile Reinforced Mortar"* ou TRM) e do desempenho de paredes de alvenaria reforçadas com esta técnica, que se tem demonstrado bastante eficaz [3]. Contudo, a eficiência do reforço TRM em construções de terra é basicamente desconhecida, principalmente em taipa. Espera-se que este tipo de reforço consiga promover uma redistribuição das tensões e retardar a perda de integridade dos componentes estruturais.

A modelação numérica é uma ferramenta

poderosa para o estudo do comportamento das construções de terra. Contudo, o comportamento altamente não linear dos materiais de terra exige o uso de modelos numéricos avançados, incorporando leis constitutivas adequadas e baseadas em evidência experimental. Neste sentido, o presente artigo apresenta uma investigação numérica avançada da resposta sísmica de um componente estrutural de taipa para fora do plano e avalia o desempenho do seu reforço com TRM.

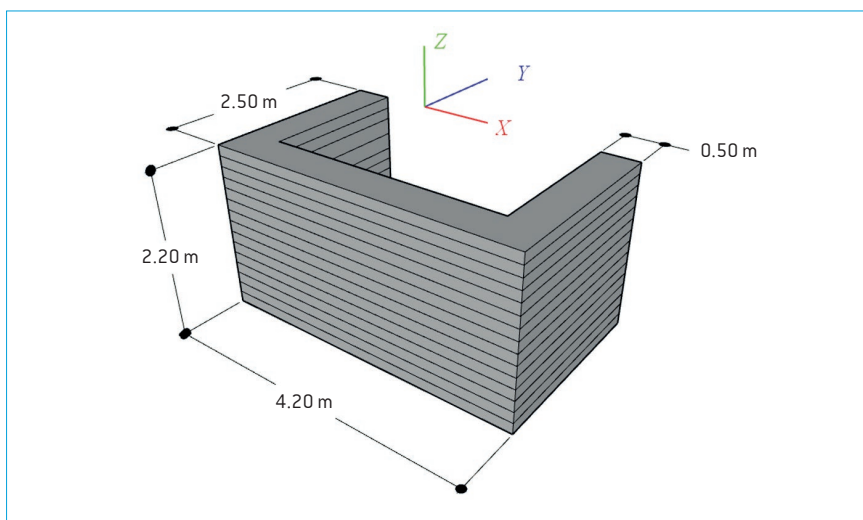
GEOMETRIA DO COMPONENTE ESTRUTURAL

Em Portugal, a região do Alentejo possui diversas habitações construídas em taipa, como se ilustra na Fig. 1. A geometria do caso de estudo a analisar numericamente deve permitir a observação do modo de rotura para fora do plano e ser representativa das construções tradicionais de taipa Alentejanas, pelo que a sua definição teve



> 1

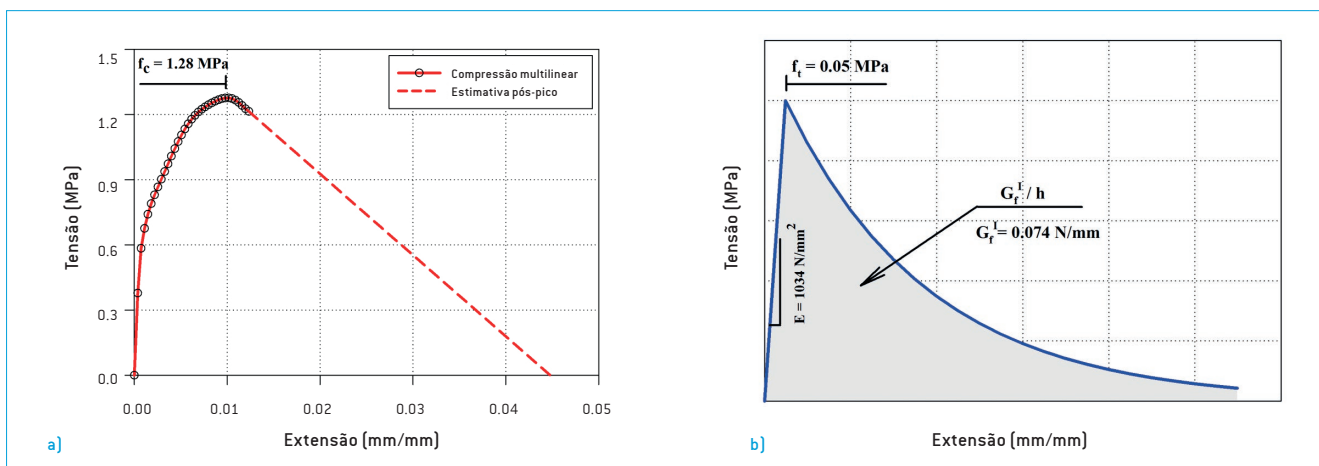
em consideração a análise de onze edifícios de taipa estudados num levantamento anterior [4]. Adotou-se uma espessura das paredes de 0,5 m, uma vez que em todos os casos foi observado este valor. Por sua vez, a altura, o comprimento e a razão comprimento/largura das paredes variam em torno de $2,2 \pm 0,3$ m, $3,7 \pm 1,5$ m e $2,2 \pm 1,0$ m, respetivamente. Assim, resultou um componente estrutural em forma de U com a geometria ilustrada na Fig. 2, que será estudado numericamente.



> 2

MODELO NUMÉRICO

Os modelos de elementos finitos (FEM) do componente não reforçado e reforçado foram elaborados e analisados com o software DIANA 10.2 [5]. O modelo material de extensão total com fenda rotativa (total strain rotating crack model, TSRCM) foi utilizado para simular o comportamento da taipa. Para o comportamento expressivamente não linear em compressão, adotou-se uma relação constitutiva multilinear [6], obtida com base em resultados experimentais [7], tal como ilustra a Fig. 3a. Por sua vez, assumiu-se uma relação exponencial, apresentada na Fig. 3b, para o comportamento à tração, cujos parâmetros foram calibrados num estudo numérico anterior [8].

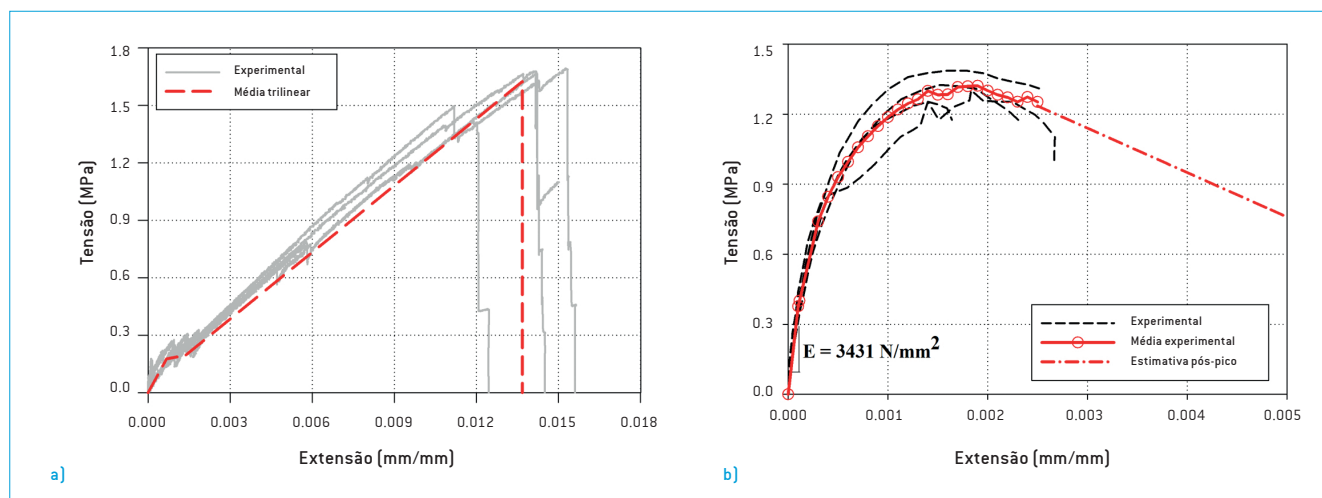


> 3

> Figura 1: Edifícios tradicionais de taipa Alentejanos.

> Figura 2: Geometria adotada para o componente estrutural de taipa.

> Figura 3: Relações constitutivas adotadas para taipa: (a) multilinear em compressão; (b) exponencial em tração.



> 4

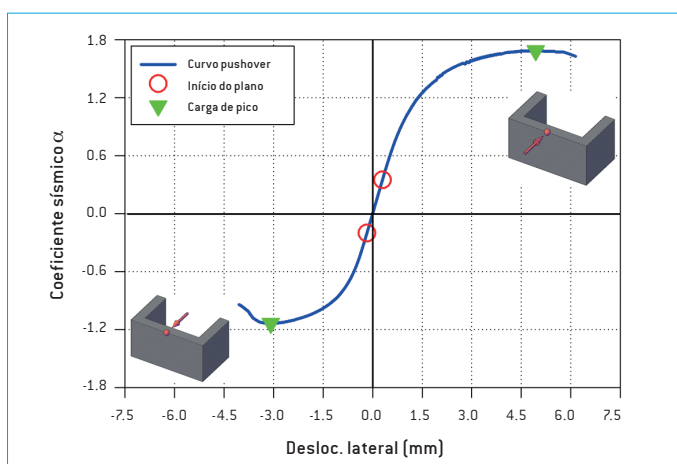
A definição das propriedades materiais do reforço TRM baseou-se num trabalho de investigação recente [9], cujo objetivo foi o desenvolvimento de soluções que garantam compatibilidade com a taipa e sejam economicamente acessíveis tendo em vista a generalização do seu uso, daí ter-se usado a designação LC-TRM (*low cost reinforced mortar*). Assim, a solução LC-TRM adotada emprega uma argamassa à base de terra sem ligantes adicionais e uma malha de plástico de baixo custo. A modelação do comportamento do material compósito LC-TRM foi realizada segundo uma abordagem semelhante à da taipa, adotando-se o modelo TSRCM. Para o comportamento em tração foi adotado um comportamento trilinear obtido a partir de ensaios de tração direta do compósito, como representado na Fig. 4a. O comportamento do compósito LC-TRM à compressão baseou-se exclusivamente em curvas experimentais obtidas de ensaios de compressão de provetes de argamassa, que resultou numa relação multilinear, ver Fig. 4b. Devido à falta de informação experimental detalhada, considerou-se a hipótese de aderência perfeita entre a malha e a argamassa. A modelação FEM 3D do componente de taipa foi realizada com elementos finitos sólidos devido à espessura relevante das pa-

redes relativamente às restantes dimensões. Relativamente às condições de fronteira, considerou-se o componente totalmente fixo na base. O reforço LC-TRM foi modelado com elementos de casca, ligados aos elementos de taipa através de elementos de interface. Assumiu-se um comportamento infinitamente rígido para esta interface, devido à ausência de resultados experimentais que permitam uma abordagem mais precisa. Considerou-se a aplicação do reforço em ambas as faces das três paredes.

ANÁLISE PUSHOVER

Com vista à caracterização da resposta sísmica para fora do plano do componente de taipa, realizaram-se análises estáticas não-lineares (pushover) no modelo não reforçado e reforçado. O padrão de carga lateral foi aplicado em ambos os sentidos da direção Y (ver Fig. 2) de forma proporcional à massa dos modelos para induzir o comportamento para fora do plano da parede central.

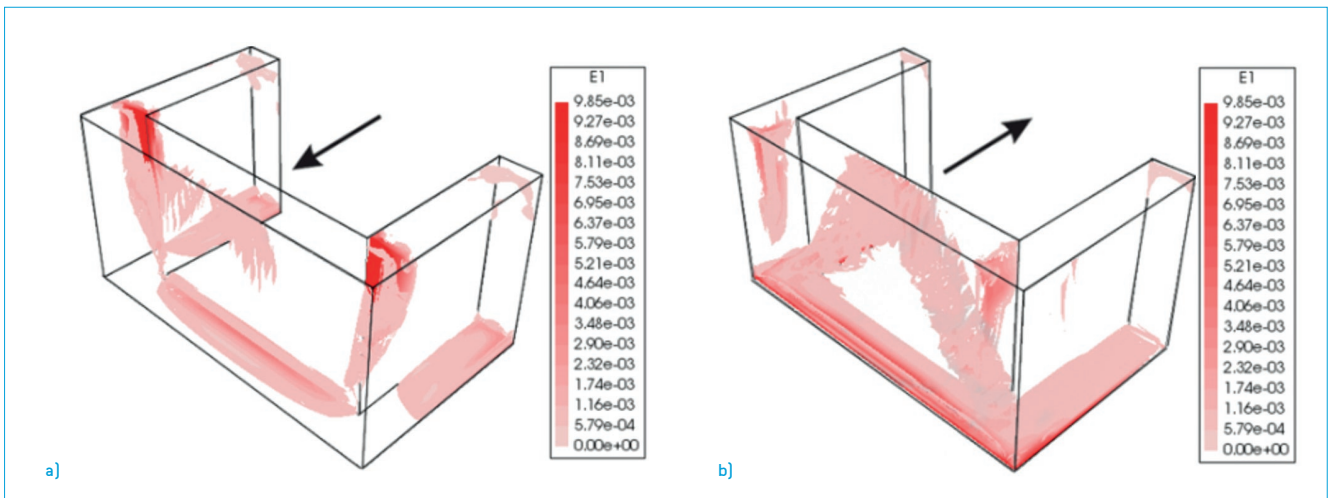
A Fig. 5 apresenta as curvas pushover do mo-



> 5

> Figura 4: Relações constitutivas adotadas para o compósito LC-TRM: (a) tração axial; (b) compressão axial.

> Figura 5: Curvas pushover do modelo não reforçado.



> 6

delo não reforçado, através da relação entre o coeficiente sísmico [corte basal normalizado pelo peso do modelo] e o deslocamento horizontal do nó de controlo (topo da secção média da parede central). A análise no sentido negativo resulta numa carga máxima e capacidade de deslocamento menores do que no sentido positivo, devido à contribuição menos eficiente das paredes laterais. Isto também explica o facto de o dano no primeiro caso ter-se iniciado para um valor do coeficiente sísmico de cerca de metade do segundo

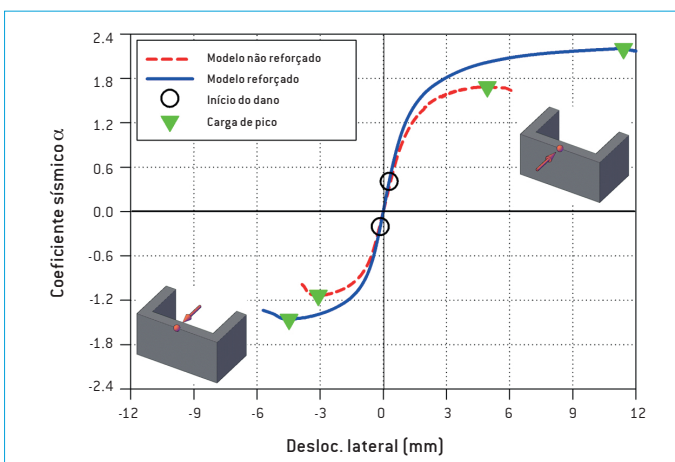
caso. Assim, demonstra-se que a direção negativa condiciona a resposta sísmica do modelo de taipa.

Relativamente ao comportamento pós-pico, o modelo carregado no sentido positivo exibe uma degradação menos frágil da capacidade do que a exibida pelo modelo carregado no sentido negativo. Neste último caso, o comportamento observado deve-se ao movimento de derrube da parede central devido à perda de ligação com as paredes laterais. No caso do carregamento no sentido positivo, a compressão gera-

da nas paredes laterais condiciona fortemente o derrube da parede central.

O padrão de dano do modelo foi avaliado com base no mapa das extensões principais de tração para as cargas de pico, tal como ilustra a Fig. 6. Relativamente ao modelo carregado no sentido negativo, os maiores valores das extensões concentram-se no topo da zona de ligação entre as paredes e também na base. Pode-se interpretar este padrão como a tendência de a parede central se desprender das paredes laterais e rodar em torno da base, colapsando para fora do seu plano. Quando o modelo é carregado no sentido positivo, ocorre a flexão da zona central da parede, sendo evidente a função de suporte exercida pelas paredes laterais.

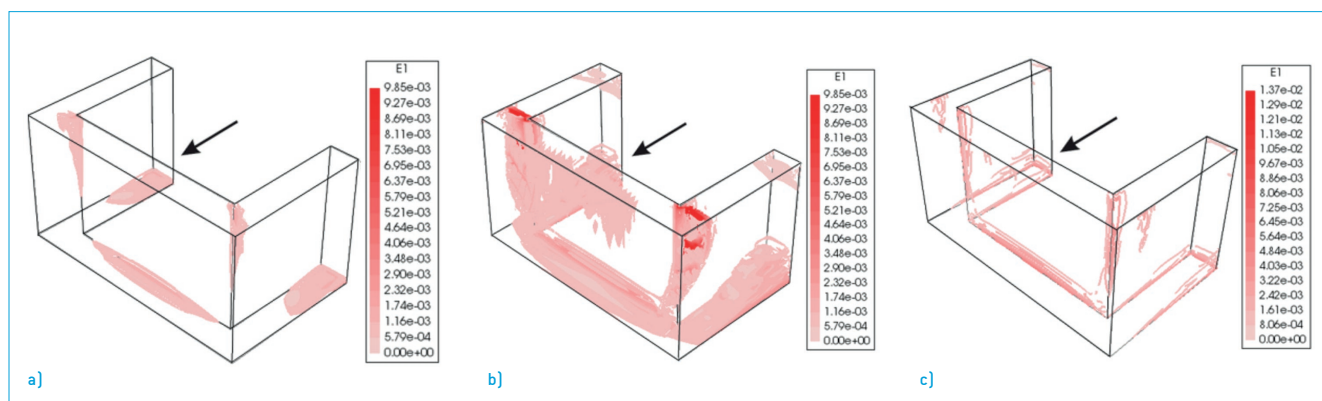
Relativamente ao desempenho do reforço LC-TRM, a Fig. 7 compara as curvas pushover do modelo reforçado com as do modelo não reforçado. Observa-se que o reforço aumenta ligeiramente a rigidez lateral pré-pico, modificando também o processo de fendilhação, embora sem influência significativa sobre o início do dano, uma vez que este tende a iniciar-se na taipa. A influência mais relevante do reforço prende-se com o aumento do nível de deslocamento lateral e capacidade de carga relativamente ao modelo não reforçado. No



> 7

> Figura 6: Mapas de extensões principais de tração para as cargas de pico do modelo carregado no: (a) sentido negativo; (b) sentido positivo.

> Figura 7: Comparação das curvas pushover do modelo não reforçado e reforçado.



> 8

caso do carregamento no sentido negativo (sentido crítico) observa-se um aumento de 45% e 29% para deslocamento e coeficiente sísmico, respetivamente. No sentido positivo o aumento é de 131% e 31%, respetivamente. A modificação dos modos de colapso foi analisada através dos mapas de extensões principais de tração apresentados na Fig. 8. A comparação direta das Fig. 6a e Fig. 8a evidencia uma redução considerável do nível das extensões no modelo reforçado para uma carga igual à carga máxima do modelo não reforçado. O destacamento entre a parede central e as paredes laterais é, assim, mitigado pela presença do reforço. É perceptível ainda uma redução das extensões de tração na base da parede, o que pode ser interpretado como uma melhoria da integridade da estrutura devido à aplicação do reforço. O reforço permite que a parede central redistribua tensões e retarda a tendência de colapso para fora do plano. O mapa de extensões apresentado na Fig. 8b evidencia que o mecanismo de rotura é semelhante ao do modelo não reforçado, envolvendo aparentemente a flexão de uma maior área da parede central. Por sua vez, os valores elevados de deformação concentrados na base demonstram a eficiência do reforço aplicado na preservação da integridade do modelo. Finalmente, o dano observado no reforço, para a carga máxima do modelo reforçado, ilustrado

na Fig. 8c, indica que este contribui para a transferência de tensões em regiões da taipa mais propensas a apresentarem dano, isto é, nas ligações entre as paredes e na base.

CONCLUSÕES

O presente artigo avalia numericamente o comportamento sísmico para fora do plano de um componente estrutural de taipa e estima a eficiência mecânica de uma solução de reforço de baixo custo baseada na técnica TRM, através de análises estáticas não lineares avançadas. Os resultados mostram que o sentido crítico corresponde ao carregamento que induz a separação da parede central das laterais. Verificou-se ainda que o dano se inicia para níveis de carga lateral muito baixos, devido ao comportamento marcadamente não linear da taipa.

Relativamente ao reforço LC-TRM, foi possível obter-se uma primeira visão sobre o comportamento esperado para a estrutura reforçada. Verificou-se que o reforço aumentou ligeiramente a rigidez lateral pré-pico, embora não tenha promovido um atraso no início do dano. A influência do reforço foi claramente visível através do aumento de deslocamento máximo e capacidade de carga em cerca de 45% e 29% (sentido crítico), respetivamente. ■

REFERÊNCIAS

- [1] Miccoli L., Müller U., Fontana P., "Mechanical behavior of earthen materials: a comparison between earth block masonry, rammed earth and cob", *Construction and Building Materials*, 2014, 61, 327-339.
- [2] Correia M.R., Varum H., Lourenço P.B., "Common damages and recommendations for the seismic retrofitting of vernacular dwellings", *Seismic Retrofitting: Learning from Vernacular Architecture*. Taylor & Francis Group, London, UK, 2015.
- [3] De Felice G., De Santis S., Garmendia L., Ghiassi B., Larrinaga P., Lourenço P.B., Oliveira D.V., Paolacci F., Papanicolaou C.G., "Mortar-based systems for externally bonded strengthening of masonry", *Materials and Structures*, 2014, 47(12), 2021-2037.
- [4] Correia M., "Rammed Earth in Alentejo", *Argumentum*, Lisbon, Portugal, 2007.
- [5] DIANA, "Displacement method ANALyser", Release 10.1, Netherlands, 2017.
- [6] Miccoli L., Oliveira D.V., Silva R.A., Müller U., Schueremans L., "Static behaviour of rammed earth: experimental testing and finite element modelling", *Materials and Structures*, 2015, 48(10), 3443-3456.
- [7] Silva R.A., Oliveira D.V., Schueremans L., Miranda T., Machado J., "Effectiveness of the repair of unstabilised rammed earth with injection of mud grouts", *Construction and Building Materials*, 2016, 127, 861-871.
- [8] Silva R.A., Oliveira D.V., Schueremans L., Lourenço P.B., Miranda T., "Modelling the structural behaviour of rammed earth components", *Proc. of the 12th International Conf. on Computational Structures Technology*, 2014, Naples, Italy.
- [9] Oliveira D.V., Silva R.A., Barroso C., Lourenço P.B., "Characterization of a compatible low cost strengthening solution based on the TRM technique for rammed earth", *Key Engineering Materials*, 2017, 747, 150-157.

> Figura 8: Mapas de extensões principais de tração do modelo reforçado no sentido -Y: (a) modelo reforçado para a carga máxima do modelo não reforçado; (b) modelo reforçado para a sua carga máxima; (c) elementos do reforço para a carga máxima do modelo reforçado.